第 37 卷第 20 期
2017 年 10 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.20
Oct.,2017

DOI: **10.5846/stxb201608011572**
弋良朋, 王祖伟.施用污泥对油菜根际养分和不同种类重金属的影响.生态学报,2017,37(20):6855-6862.
Yi L P, Wang Z E.Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for rape grown in soil amended with sludge.Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6855-6862.

施用污泥对油菜根际养分和不同种类重金属的影响

弋良朋*, 王祖伟
天津师范大学天津市水环境与水资源重点实验室, 天津 300387

摘要:根际是控制植物养分动态的重要因素,养分动态也影响着根际土壤环境。当土壤被污水污泥改良后,根际土壤中的养分和重金属性质也会发生变化。目前很少有人研究施用污泥的土壤中植物根系对根际重金属有效性和分布的影响。采用根垫—冰冻薄层切片法对施用污泥后土壤中油菜根际的养分和重金属分布情况进行研究,以期探明污泥改良土壤中根际重金属的活化特征。当土壤施用污泥后,根际土壤中 DTPA 提取态 Zn,Cd,Ni,Mn,有效磷,有效钾和铵态氮被显著消耗,而根际土壤中 DTPA 提取态 Cu 没有明显的消耗或积累。当土壤中施用大量污泥时,根际土壤的 pH 值随着离根表面距离的增加而增加。无论土壤是否用污泥处理,油菜根际土壤中可交换态 Cu 都显著减少。当土壤被 50%污泥改良时,在距离根表面 0—2 mm 处的油菜根际土壤中碳酸盐结合态,铁锰氧化物结合态,有机物结合态,残渣态的 Cu 和 Zn 都被消耗较多。污泥的施用对油菜的生长有促进作用。随着污泥施用量的增加,油菜地上部分 Cu 和 Zn 的含量没有显著变化。施用污泥量小于 25%的土壤中,污泥没有增加重金属的可利用性和移动性。除了 Cu,油菜根际土壤中 DTPA 提取态 Zn,Cd,Ni 的减少表明施用污泥的土壤中重金属的活化是非常有限的。

关键词:根际;污泥;重金属;油菜;养分

Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for rape grown in soil amended with sludge

YI Liangpeng*, WANG Zuwei
Tianjin Key Laboratory of Water Environment and Resources, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, *China*

Abstract: The rhizosphere contains important factors controlling nutrient dynamics in this zone and the mineral nutrition of plants. Nutrient dynamics also influence the environment of the rhizosphere. The nutrients and heavy metals in the rhizosphere change when soil is amended with sewage sludge. However, little attention has been given to the extent to which plant roots affect the availability and distribution of heavy metals near roots in soils amended with sludge. The objectives of the present study were to investigate the distribution of heavy metals and nutrients in the rhizosphere of *Brassica campestris* grown in sludge-amended soil, and to predict the availability of metals in sludge-amended soil. The distribution of nutrients and heavy metals in the rhizosphere in sludge-amended soil was investigated using the root mat and a frozen thin slicing technique to provide indications regarding the activation of heavy metals. DTPA-extractable Zn, Cd, Ni, and Mn, available P and K, and ammonium nitrogen in the rhizosphere were markedly depleted when soil was amended with sludge. There was no conspicuous depletion or accumulation of DTPA-extractable Cu in the rhizosphere when the soil was amended with sludge. The pH value in the rhizosphere increased with distance from the roots when soil was amended with larger amounts of sludge. The exchangeable fraction of Cu in the rhizosphere was depleted whether or not the soil was treated with sludge. Carbonate, oxide, organic, and residual fractions of Cu and Zn were depleted in the rhizosphere at a distance of 0—2 mm from the roots when soil was amended with 50% sludge. Application of sewage sludge had a positive effect on *Brassica*

基金项目:国家自然科学基金项目(40940010,40973078);天津市水资源与水环境重点实验室开放基金
收稿日期:2016-08-01; **网络出版日期**:2017-06-01

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: yiliangpeng@126.com

campestris growth. With an increase in sludge amounts, the concentrations of Cu and Zn in aboveground parts of *Brassica campestris* did not change. Soil amendments with less than 25% sludge did not increase the availability or mobility of heavy metals. The depletion in rhizospheric DTPA-extractable Zn, Cd, and Ni indicated that with the sole exception of Cu, release of metals from sludge-amended soil was very limited.

Key Words: rhizosphere; sludge; heavy metals; *Brassica campestris*; nutrients

重金属污染土壤的利用问题是当前土壤环境领域的一个难点,直接利用其种植农作物将使重金属进入食物链而危害人体健康。如何对重金属污染土壤改良并加以利用,使其种植出的农产品能够得到应用是目前很多学者研究的问题,并在很多方面取得了进展[1-3]。我国每年城市生活污水处理厂会产生大量的污泥,这些污泥当中很多当做固体废物被填埋或焚烧,没有得到有效的利用[4]。利用城市生活污水处理厂产生的合格污泥作为土壤改良剂来改造重金属污染的土壤使其能够得到利用是污泥资源化的途径之一,如果可行,既可以使污水处理厂的污泥这种固体废物得到资源化利用,同时还可以在一定程度上解决重金属污染土壤的利用难题。

不同种类的重金属在土壤中的化学性质有很大的差异,并且重金属在植物根际土壤中的化学特征对其有效性有重要意义[5-6]。根际是指植物根系周围附近的那部分土壤,其范围是从根表面到距离其大约 5 mm 的区域,由于受到根生命活动及其分泌物的影响,其物理、化学和生物学性质与土体(非根际土)有很大的差异,是一个既依赖于土壤生态系统又相对独立的微生态系统,有着非常活跃的化学和生物化学过程[7]。由于植物根的吸收、呼吸、分泌等生理作用,改变了根附近土壤中的许多生物化学过程,例如,根际内营养元素、有毒元素(例如铝,镉)、污染物的稀释与富集,根际内络合物的变化等[8-9]。发生在根际土壤溶液中的生物化学过程影响着土壤中各种物质的迁移和转化,也影响了重金属的可利用性[10]。根际土壤特征是控制这个区域养分动态的重要因素,同时养分动态也影响着根际土壤环境[11]。当土壤被污泥改良以后,根际土壤的养分和不同种类重金属的特征也会发生变化,但很少有人进行过相关研究,因此本研究的目的是利用根际土壤冰冻切片法研究施用污泥对油菜(*Brassica campestris*)根际土壤中不同种类重金属的影响,在污泥改良过的土壤中油菜根际土壤中不同种类重金属和养分的分布。通过在重金属污染的土壤上种植油菜这种油料作物,产生的油料可以制成生物柴油,如果秸秆符合相关标准,也可以做为牲畜的饲料;本研究还将探明施用不同量污泥对油菜吸收不同种类重金属的影响,这些研究成果可以在实践中指导用污泥来改良土壤,也可为利用某些种类重金属污染的土壤提供参考数据。

1 材料与方法

实验采用油菜作为植物材料,油菜为十字花科的油料作物,根系发达,有较强的耐寒、抗旱能力,对土壤选择不严,并具有一定的耐盐性和耐重金属的特点[12];油菜茎叶还是畜禽的优良青绿饲料。

京津两地以前曾有大量未经处理的工业和生活污水通过永定新河、北京排污河等排入渤海,这些过境污水,曾经成为天津弥补农业用水不足的重要措施,形成了长达几十年的污灌区。污水灌溉在解决农业用水不足的同时,污水中含有的大量重金属元素随之进入土壤中[13-14]。因此,本研究选择天津大沽排污河污灌区土壤做为实验用的土壤材料,土壤质地为重壤土,选用的土壤和污泥的化学性质如表 1 所示。

实验选用的脱水厌氧消化污泥是从天津东郊污水处理厂采集的。通过对照相关标准[15],选用的污泥能够达到国家规定的污泥使用重金属含量标准。实验采用 4 个处理,分别是在实验用的干燥土壤中加入 0%, 10%,25%和 50%(质量比)的干燥污泥,并使污泥与土壤完全混合均匀,每个处理 5 个重复。实验装置是在本人 2008 年工作的基础上设计[16],采用根垫—冰冻薄层切片法的实验装置并加以改进后进行操作处理,用于分开根际微域中离根表面不同距离的土壤,该方法可以用于研究植物根系对根际土壤中各种物质分布的影响。先在温室中种植培育油菜 35 d 后形成根垫,把根垫下的土壤取出后迅速放入液氮中冰冻,然后用切片机

逐层切取根垫下的土壤薄片,就能得到距根表面不同距离处的根际土壤,通过对根际不同位置土壤的理化性质分析,从而得知根际内各种物质的分布和运移特征。

表 1　供试污泥和土壤的主要化学性质

Table 1　Selected chemical properties of sludge and soil

因子 Parameters	供试污泥 Sludge	供试土壤 Soil	因子 Parameters	供试污泥 Sludge	供试土壤 Soil
总盐 Total salt /(g/kg)	2.24	7.76	有效磷 Available P/(mg/kg)	1351	21.66
pH	7.88	7.22	有效钾 Available K/(mg/kg)	22.35	87.34
有机质 Organic carbon /(g/kg)	295.36	12.13	Cd /(mg/kg)	3.51	2.25
总 N Total N /(g/kg)	35.38	0.92	Cu /(mg/kg)	113	441
总 P Total P /(g/kg)	18.62	0.35	Mn /(mg/kg)	56.45	373
全 K Total K /(g/kg)	6.72	10.54	Ni /(mg/kg)	28.53	81.28
有效氮 Available N/(mg/kg)	1238	68.32	Zn /(mg/kg)	230	1127

把通过实验装置获取的不同土壤样品完全风干后测定本研究所需的各项土壤指标。参照用 Tessier 等人使用的连续提取方法[17],把重金属污染土壤中的 Cu 和 Zn 分为不同形态的 5 部分,分别为:(1)可交换态(2)碳酸盐结合态(3)铁锰氧化物结合态(4)有机物结合态(5)残渣态;DTPA 提取态 Mn,Cu,Zn,Ni,Cd 的测定见参考文献[18];采用 ICP-MS 测定土壤和植物体中 Mn,Cu,Zn,Ni,Cd 的含量;其余土壤化学指标的测定采用常规方法,详见参考文献[19-20]。

采用 Excel 2003 进行绘图,SPSS 18.0 进行方差分析和多重比较(Duncan 氏新复极差法)。

2　结果与分析

2.1　根际土壤中的酸碱度

土壤的酸碱性对重金属和养分的有效性有重要影响[21]。根际土壤酸碱性的变化能影响植物根系对许多阴、阳离子的吸收率[22]。表 2 结果表明,当土壤未施用污泥时,油菜根际内,在距离根表面 0—2 mm 处土壤的 pH 高于远离根表面的土壤。通过表 3 可知,硝态氮是油菜的主要氮源,它导致了根际土壤 pH 上升。相反,当铵态氮作为油菜的氮源时,根际土壤 pH 是下降的。随着污泥施用量的增加,油菜根际土壤 pH 显著降低。当土壤被 10%的污泥或没有污泥处理时,随着与根的距离增加而降低。当土壤被≥25%的污泥处理后,根际的 pH 值随着与根距离的增加而上升,这很可能是用≥25%的污泥处理土壤后,土壤中铵态氮浓度的增加而导致的,因为在用≥25%的污泥处理后的土壤根际中,铵态氮浓度远远高于硝态氮浓度(表 3)。实验结果表明施用污泥后,相对于土体,随着污泥量的增加,土壤根际的酸度也随之增加。

表 2　施用污泥的土壤中油菜根际 pH 值的变化

Table 2　The rhizosphere pH gradient of *Brassica campestris* grown in soil amended with sludge

污泥的施用量 Rates of sludge	离根表面的不同位置 Distance from the root surface / mm	pH	污泥的施用量 Rates of sludge	离根表面的不同位置 Distance from the root surface / mm	pH
不加污泥	0—2	8.02±0.64 a	加 25%的污泥	0—2	6.93±0.55 e
Without sludge	2—4	7.43±0.61 b	25% sludge	2—4	7.01±0.68 e
	4—6	7.21±0.60 cd		4—6	7.12±0.51 d
加 10%的污泥	0—2	7.49±0.58 b	加 50%的污泥	0—2	7.22±0.57 cd
10% sludge	2—4	7.37±0.59 b	50% sludge	2—4	7.54±0.62 b
	4—6	7.26±0.65 c		4—6	7.75±0.67 a

同一列标有不同字母者表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著

2.2 根际土壤中有效养分的分布

根际土壤中有效养分的分布受到土壤养分状况,植物的吸收和土壤理化性质的影响。当土壤没有施用污泥时,在距根表面不同距离的土壤中硝态氮,有效磷和有效钾的浓度没有表现出任何显著差异(表3)。当土壤施用25%和50%的污泥后,根际土壤中距离根表面0—2 mm处的铵态氮,有效磷和有效钾的浓度明显低于其在距离根表面2—4 mm和4—6 mm处的浓度,距离根表面越远,铵态氮,有效磷和有效钾的浓度越高。这表明当土壤被污泥改良后,根际土壤硝态氮,有效磷和有效钾被植物根不断地吸收而减少,并且这些物质在根际中不断向根表面扩散,而它们在根际中被吸收的量大于从施用污泥的土体中得到补充的量。而对于硝态氮,无论土壤是否施用污泥,都表现出在根际土壤中显著积累的相反特征,这表明其进入根际的量高于植物吸收的量。铵态氮和硝态氮在油菜根际内分布特征的差异,说明油菜对铵态氮的吸收利用量高于硝态氮。

表3 施用污泥的土壤中油菜根际主要有效养分的含量

Table 3 Concentrations of available nutrients in the rhizosphere of *Brassica campestris* grown in soil amended with sludge

污泥的施用量 Rates of sludge	离根表面的不同位置 Distance from the root surface/mm	有效养分的含量 Concentrations of available nutrients/(mg/kg)			
		铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	有效磷 Available P	有效钾 Available K
不加污泥 Without sludge	0—2	13.82±1.54fg	1.13±0.08c	1.08±0.06g	26.2±2.08e
	2—4	13.36±1.23g	0.82±0.05c	1.35±0.05g	29.8±2.65e
	4—6	13.17±1.12g	0.83±0.09c	1.50±0.09g	26.5±1.49e
加10%的污泥 10% sludge	0—2	13.84±1.36fg	4.24±0.26bc	14.9±1.58f	31.5±2.72e
	2—4	17.02±1.26fg	1.83±0.19c	16.9±1.56f	38.8±2.41d
	4—6	15.53±1.14fg	1.79±0.08c	16.5±1.39f	42.8±2.63cd
加25%的污泥 25% sludge	0—2	20.32±1.54ef	23.6±2.84a	59.8±2.69e	28.5±2.14f
	2—4	25.51±1.69de	14.8±0.89b	68.0±3.87d	39.6±2.47d
	4—6	27.30±1.58d	9.4±0.83b	67.1±3.49d	42.9±3.21cd
加50%的污泥 50% sludge	0—2	36.73±2.15c	21.7±1.25a	137.3±15.25c	47.7±2.83c
	2—4	50.48±5.61b	19.1±1.36a	155.9±16.34b	60.1±3.71b
	4—6	67.92±4.24a	20.3±2.31a	176.9±13.37a	68.5±3.25a

2.3 根际土壤中重金属的分布

2.3.1 DTPA提取态重金属在根际内的分布特征

根际土壤中离根表面不同距离处的重金属有效态含量比土体中更重要。DTPA提取法是获得重金属有效态的有效方法之一[23]。污泥的施用使得DTPA提取态的Mn,Cu,Zn,Ni,Cd的浓度显著增加(表4),可能是污泥中的有机物对这些重金属起了作用。Cu没有表现出很明显的离根表面距离不同而发生变化的现象,这表明Cu可能在土壤中有较高的移动性,在施用污泥的根际土壤中,植物根吸收Cu的量和从土体中的流入量基本达到了平衡状态。在根际中,Zn和Ni表现出与Cu不同的分布特征,只有当土壤中施用了较大量的污泥(污泥量≥25%时)后,DTPA提取态的Zn和Ni在根际土壤的浓度才显著低于土体内的浓度。随着与根表面距离的增加,DTPA提取态的Zn和Ni的浓度显著上升,并且随着污泥施用量的增加而增大。DTPA提取态Cd只有在土壤施用大量污泥后,其根际中的浓度才表现出显著的差异,这表明经污泥改良过的土壤中,污泥对Cd的影响较小。DTPA提取态Zn,Ni和Cd的移动性低于Cu,说明油菜根对这3种元素的吸收量大于土体扩散到根际中的量。随着离根表面距离的增加,DTPA提取态Mn在施用污泥土壤的根际中的浓度是不断增加的,说明污泥对其有影响;在根际中,距离根表面越近,浓度越低,但只有在施用50%的污泥时才表现出显著的差异。

2.3.2 根际内不同形态Cu和Zn的分布特征

土壤中重金属元素的迁移、转化,对植物的毒害及其对环境的影响程度,除了与土壤中重金属的含量有关外,还与重金属元素在土壤中的存在形态有很大关系[24]。土壤中重金属存在的形态不同,其活性、生物毒性及迁移特征也不同[25]。Cu和Zn是本实验采用的污染土壤中主要重金属种类,并且有相关国家标准[20]。表

5 和表 6 显示了根际土壤中 Cu 和 Zn 的不同形态(Tessier 法)[17],发现无论土壤是否施用污泥,在距根表面 0—2 mm 的土壤中可交换态 Cu 都表现出明显的减少,根际土壤中其它化学形态的 Cu 在没有施用污泥的土壤中均无显著差异。被 10%和 50%污泥改良后的土壤中碳酸盐结合态的 Cu 在距根表面 0—2 mm 处的浓度明显低于距根表面4—6mm处的浓度,这表明当土壤被污泥改良后,油菜能够吸收碳酸盐结合态的Cu,铁

表 4　施用污泥的土壤中油菜根际 DTPA 提取态重金属的含量

Table 4　Concentrations of DTPA-extraction heavy metals in the rhizosphere of *Brassica campestris* grown in soil amended with sludge

污泥的施用量 Rates of sludge	离根表面的不同位置 Distance from the root surface / mm	DTPA 提取态金属的含量 Concentrations of DTPA- extraction metals /(mg/kg)				
		Mn	Cu	Zn	Ni	Cd
不加污泥 Without sludge	0—2	5.01±0.95fg	1.62±0.15e	2.33±0.25g	0.22±0.03g	0.01±0.001c
	2—4	3.61±0.62g	2.43±0.26e	2.39±0.18g	0.19±0.04g	0.01±0.002c
	4—6	4.06±0.54g	2.43±0.21e	2.52±0.27g	0.18±0.01g	0.01±0.002c
加 10%的污泥 10% sludge	0—2	4.99±0.61fg	4.35±0.52d	7.18±0.84fg	0.32±0.05fg	0.01±0.003c
	2—4	6.38±0.53def	4.67±0.65d	9.49±0.95f	0.41±0.06f	0.02±0.003c
	4—6	6.22±0.67ef	4.73±0.44d	9.52±1.61f	0.34±0.02fg	0.02±0.002c
加 25%的污泥 25% sludge	0—2	6.27±0.58def	9.06±0.84c	13.1±1.42ef	0.66±0.05e	0.02±0.003c
	2—4	7.18±0.64de	9.73±0.97c	17.5±1.65de	1.16±0.18d	0.03±0.003bc
	4—6	8.26±0.96d	9.53±0.85c	21.1±2.07d	1.15±0.12d	0.04±0.002bc
加 50%的污泥 50% sludge	0—2	13.4±1.64c	24.1±3.21a	50.1±5.26c	2.06±0.32c	0.06±0.008bc
	2—4	19.1±1.52b	22.7±3.69b	66.5±6.58b	2.97±0.43b	0.09±0.008b
	4—6	21.4±2.31a	23.7±3.42ab	80.1±6.35a	3.31±0.26a	0.16±0.009a

表 5　施用污泥的土壤中油菜根际不同形态 Cu 的含量和占比

Table 5　Concentration and proportion of copper fractions in the rhizosphere of *Brassica campestris* grown in soil amended with sludge

污泥的施用量 Rates of sludge	离根表面的不同位置 Distance from the root surface/mm	不同形态 Cu 的含量和占比 Concentrations and proportions of Cu fractions/(mg/kg)					
		可交换态 Exchangeable	碳酸盐结合态 Carbonate	铁锰氧化物结合态 Oxide	有机物结合态 Organic	残渣态 Residual	总量 Total
不加污泥 Without sludge	0—2	0.11±0.02g 2.8%	0.22±0.02f 5.5%	0.63±0.04e 15.8%	1.30±0.08d 32.6%	1.73±0.21de 43.4%	3.99±0.41h 100%
	2—4	0.21±0.02fg 5.6%	0.27±0.01f 7.1%	0.61±0.04e 16.1%	1.54±0.09d 40.7%	1.15±0.13e 30.4%	3.78±0.29h 100%
	4—6	0.28±0.02f 7.6%	0.23±0.01f 6.3%	0.63±0.05e 17.2%	1.12±0.08d 30.5%	1.41±0.15e 38.4%	3.67±0.27h 100%
加 10%的污泥 10% sludge	0—2	0.46±0.04e 5.4%	0.45±0.03e 5.3%	1.43±0.11d 16.7%	2.64±0.12c 30.9%	3.56±0.22d 41.7%	8.54±0.61g 100%
	2—4	0.59±0.03d 6.7%	0.49±0.05e 5.6%	1.48±0.05d 16.9%	2.68±0.16c 30.6%	3.51±0.31d 40.1%	8.75±0.59g 100%
	4—6	0.67±0.04d 7.3%	0.66±0.05d 7.2%	1.57±0.14d 17.0%	2.79±0.25c 30.3%	3.53±0.24d 38.3%	9.22±0.84g 100%
加 25%的污泥 25% sludge	0—2	0.89±0.09c 5.4%	0.82±0.04c 4.9%	2.79±0.25c 16.8%	6.13±0.48b 36.9%	5.97±0.32c 36.0%	16.6±1.51f 100%
	2—4	0.90±0.08c 4.7%	0.83±0.05c 4.3%	3.14±0.31c 16.4%	6.88±0.43b 36.0%	7.35±0.58c 38.5%	19.1±1.69e 100%
	4—6	0.89±0.08c 4.1%	0.86±0.05c 3.9%	2.94±0.36c 13.4%	6.65±0.31b 30.4%	10.6±0.64b 48.4%	21.9±1.25d 100%
加 50%的污泥 50% sludge	0—2	1.08±0.14b 2.6%	1.45±0.08b 3.5%	4.48±0.37b 10.7%	22.6±1.86a 53.9%	12.3±1.03b 29.4%	41.9±2.43c 100%
	2—4	1.18±0.12ab 2.7%	1.63±0.09a 3.7%	5.01±0.41ab 11.3%	22.0±1.65a 49.8%	14.4±0.28a 32.6%	44.2±3.12b 100%
	4—6	1.26±0.09a 2.7%	1.73±0.15a 3.7%	5.38±0.42a 11.5%	22.1±1.58a 47.3%	16.2±1.24a 34.7%	46.7±2.11a 100%

锰氧化物结合态和有机物结合态 Cu 的浓度也随着污泥量的增加而上升,但是与距根表面的距离没有显著相关性。根际土壤中 Zn 化学形态的变化不同于 Cu,所有的形态随着污泥量的增加都表现出显著差异,除了可交换态,污泥量和距根表面的距离都影响不同化学形态的含量变化。当土壤被 25%和 50%污泥改良后,碳酸盐结合态的 Zn 在距根 0—2 mm 处的根际土壤中表现出显著减少;当土壤被 50%污泥改良后,铁锰氧化物结合态,有机物结合态和残渣态的 Zn 与碳酸盐结合态的 Zn 有相似的趋势表现。根际中 Cu 和 Zn 各种化学形态的分析结果表明,当土壤中加入高浓度的污泥时,油菜不仅可以吸收可交换态的 Cu 和 Zn,而且还可以吸收碳酸盐结合态的 Cu 和 Zn。

表 6　施用污泥的土壤中油菜根际不同形态 Zn 的含量和占比

Table 6　Concentration and proportion of Zinc fractions in the rhizosphere of *Brassica campestris* grown in soil amended with sludge

污泥的施用量 Rates of sludge	离根表面的不同位置 Distance from the Droot surface/mm	不同形态 Zn 的含量和占比 Concentrations /(mg/kg) and proportions of Zn fractions					
		可交换态 Exchangeable	碳酸盐结合态 Carbonate	铁锰氧化物结合态 Oxide	有机物结合态 Organic	残渣态 Residual	总量 Total
不加污泥 Without sludge	0—2	0.67±0.04d 3.1%	0.52±0.03gh 2.4%	5.62±0.37fgh 26.1%	1.15±0.12hi 5.3%	13.5±0.09e 62.8%	21.5±1.63h 100%
	2—4	0.59±0.04d 2.7%	0.29±0.02h 1.3%	4.71±0.32gh 21.7%	1.25±0.22ghi 5.8%	14.9±1.25de 68.7%	21.7±1.52h 100%
	4—6	0.65±0.05d 3.0%	0.51±0.03gh 2.4%	4.54±0.28h 21.0%	1.01±0.14i 4.7%	14.9±1.56de 69.0%	21.6±1.48h 100%
加 10%的污泥 10% sludge	0—2	2.47±0.12cd 6.5%	1.27±0.08fgh 3.3%	9.97±0.62e 26.2%	1.71±0.19fg 4.5%	22.7±2.36c 59.6%	38.2±2.39fg 100%
	2—4	3.17±0.15cd 9.1%	1.58±0.11fg 4.5%	9.23±0.53ef 26.5%	1.48±0.08fg 4.3%	19.3±1.84cde 55.5%	34.8±2.55g 100%
	4—6	3.37±0.13cd 9.3%	1.57±0.13fg 4.3%	8.83±0.65efg 24.3%	1.36±0.15gh 3.7%	21.3±1.67cd 58.5%	36.4±1.72g 100%
加 25%的污泥 25% sludge	0—2	5.05±0.32bc 10.7%	2.15±0.18ef 4.6%	14.4±1.06d 30.6%	1.89±0.13de 4.0%	23.5±2.34c 50.0%	47.0±3.92ef 100%
	2—4	6.53±0.41bc 13.1%	2.87±0.16de 5.8%	16.0±1.26d 32.2%	2.05±0.16d 4.1%	22.3±2.29c 44.9%	49.7±2.65e 100%
	4—6	7.62±0.63b 11.5%	3.47±0.12d 5.2%	17.3±1.35d 26.0%	2.15±0.11d 3.2%	36.0±1.87b 54.1%	66.5±3.83d 100%
加 50%的污泥 50% sludge	0—2	14.8±1.27a 13.4%	15.1±1.43c 13.7%	39.6±2.64c 35.9%	3.50±0.18c 3.2%	37.4±0.25b 33.9%	110.4±8.64c 100%
	2—4	18.8±1.36a 13.9%	24.4±1.57b 18.1%	51.3±3.07b 38.1%	3.86±0.26b 2.9%	36.1±0.16b 26.8%	134.5±7.39b 100%
	4—6	16.2±1.29a 10.2%	28.6±1.84a 18.0%	56.2±3.29a 35.3%	4.30±0.41a 2.7%	54.0±0.23a 33.9%	159.3±9.26a 100%

2.4　施用污泥对油菜生长的影响和其对重金属吸收量的影响

图 1 显示了施用污泥对油菜生长产生干物质量的影响情况。随着污泥施用量的增加,油菜的地上部分、根部和植株总干重几乎都显著增加,说明污泥的施用为植物生长提供了良好的营养物质来源并改善了土壤条件,但是,用高于 25%的污泥来对土壤进行改良,油菜生物量并没有进一步显著增加。表 7 显示了油菜地上部分不同种类重金属的浓度,随着施用污泥量的不断增加,油菜地上部分 Cu,Zn 的浓度都没有显著增加,然而施用 25%和 50%的土壤中,油菜地上部分的 Ni 浓度有显著的增加。油菜地上部分的 Mn 的浓度与污泥量的增加没有显著相关性。油菜地上部分的 Cd 的浓度非

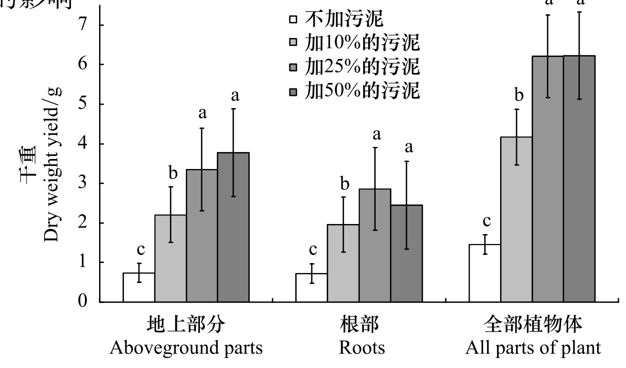


图 1　施用污泥的土壤中油菜不同部分的干物质量

Fig.1　The effect of sludge application on dry matter yield of *Brassica campestris*

常低,说明其进入地上部分的量很少。因此,污泥施用量的增加并没有使 Cu,Zn,Cd 在植物地上部分的浓度增加。虽然当土壤经高浓度污泥的改良后,油菜吸收了碳酸盐结合态的 Cu 和 Zn,但是油菜地上部分的 Cu 和 Zn 的浓度相对于没有经过污泥改良的土壤没有显著提高,具体原因需要进行更深入地探索和研究。

表 7　施用污泥的土壤中油菜地上部分重金属的含量

Table 7　Heavy metal concentrations of aboveground parts in *Brassica campestris* grown in soil amended with sludge

污泥的施用量 Rates of sludge	Mn /(mg/kg)	Cu /(mg/kg)	Zn /(mg/kg)	Ni /(mg/kg)	Cd /(mg/kg)
不加污泥 Without sludge	185.9±13.2b	28.2±1.39a	77.6±4.55a	2.11±0.29b	0.09±0.007a
加 10%的污泥 10% sludge	134.6±11.5c	26.1±1.57a	61.4±4.23a	2.65±0.38b	0.11±0.008a
加 25%的污泥 25% sludge	292.5±15.6a	29.7±1.67a	84.3±5.36a	4.60±0.45a	0.07±0.008a
加 50%的污泥 50% sludge	197.0±14.8b	25.8±1.54a	74.9±5.10a	4.64±0.36a	0.08±0.006a

3　讨论

从本研究的结果可以看出随着污泥量的增加,增加了根表面的硝化作用(表 2),其中污泥有助于降低 pH 值,而土壤中污泥量越高,根附近的 pH 值越低,也可能是由于根系分泌物造成的,但本研究并未对其进行测定和分析。综合对比分析根际中几种有效养分的含量可以看出,有效养分中除了硝态氮的浓度变化不明显,铵态氮,有效磷和有效钾的浓度随着离根表面距离和污泥量的增加而增大(表 3),说明污泥的施用量和根际土壤中这些有效养分的含量成正相关,污泥的施用增加了根际中有效养分的含量,有利于油菜根吸收利用这些养分,并有利于油菜的生长。根际营养物质的扩散和移动取决于:植物根的作用,其在土壤溶液中的浓度和土壤性质,如阳离子交换量,有机质含量和土壤质地等[26]。通过表 3 可以看出,污泥施用量的不同,没有改变土壤中养分扩散和移动量的特征,随着污泥施用量的增加,根际土壤中有效养分的浓度虽然增加了,但在根际内的变化趋势是一致的,距离根表面越近的地方,浓度越低,这可能与这些养分被根大量吸收有关[27]。

根际中污泥量的增加使得土壤中有效态重金属含量增加,这可能是由于污泥中的有机物使得重金属活化[28-29]。根际土壤中 DTPA 提取态重金属的浓度,特别是 Mn,Zn 和 Ni,随着与根表面距离的增加和污泥施用剂量的加大有显著上升,但是 Cu 和 Cd 的浓度没有很明显地变化;虽然 DTPA 提取态的 Cu,Mn,Zn,Ni,Cd 的含量随着土壤中污泥量的增加而上升,但是 Zn,Ni,Cd 在根际中的移动性没有很明显地增加(表 4),这些都反映了不同种类的重金属在污泥改良土壤中的表现是有差异的,也说明油菜对这几种重金属元素的吸收量有所不同,并且不同污泥施用量的土壤中生长的油菜,它们地上部分 Cu,Zn,Cd 的含量没有显著性差异(表 7),利用这一研究发现,在被这 3 种重金属污染的土壤中施用污泥,得到的油菜籽可以用来榨油,并且油菜地上部分也可以用来做畜禽饲料,这些发现可以为我们利用含不同种类重金属的土壤种植油菜和其它农作物提供参考,对于在土壤中移动性小的,植物吸收量少的重金属种类污染的土壤,我们可以利用其种植农作物并加以利用。结合实验中不同种类重金属 DTPA 提取态的含量和这些重金属在油菜地上部分的含量,我们发现,Cd 在根际土壤中有效态的含量和植物地上部分的含量与污泥施用量都没有相关性,这表明,污泥对 Cd 元素在土壤—植物体的迁移和转化中不起作用。

实验结果显示(图 1),用 25%左右的污泥改良重金属污染的土壤用来种植油菜有较好的效果,但施用高于 25%的污泥对油菜的生长没有更显著的促进作用,并且还使得 Mn 和 Ni 在植物体地上部分的含量增加较多(表 7),不利于油菜产品的进一步利用,污泥也没有得到有效利用。在实践中可以参照这一比例在土壤中施用污泥来改良土壤种植油菜。本实验的有关数据和结果对于污染土壤中不同种类的重金属中施用不同浓度的污泥改良土壤提供了数据参考,从而可以有效利用被重金属污染的土壤。本研究只利用了油菜这种油料作物进行了相关研究,将来可以利用其它作物进行有关实验研究,为利用重金属污染的土壤提供更广阔的途径。

4 结论

当土壤中施用大量污泥后,油菜根际土壤的 pH 值随着离根表面距离的增加而增加。当土壤经过污泥改良时,根际土壤的 DTPA 提取态的 Mn,Zn,Ni,Cd,有效 P,有效 K 和铵态氮被植物根吸收较快;土壤中 DTPA 提取态 Cu 在不同处理的根际内都没有明显减少或增加,其它 DTPA 提取态重金属的含量在施用污泥处理的根际土壤中有减少,是因为这些重金属没有大量向根表面移动,这表明经污泥改良后的土壤中除了 Cu 以外,其它重金属元素的移动性没有增加。当土壤经 50%污泥改良后,根际土壤的碳酸盐结合态,铁锰氧化物结合态,有机物结合态和残渣态的 Cu 在距根表面 0—2 mm 处明显减少。当土壤经过大量污泥改良后,油菜不仅吸收了可交换态的 Cu 和 Zn,还吸收了碳酸盐结合态 Cu 和 Zn。不断增加污泥量对油菜地上部分中的 Cu 和 Zn 的浓度没有显著影响。本实验只研究了短时间污泥对油菜根际土壤中的养分和重金属特征的影响,但评估污泥应用的长期影响需要更多的实验和研究。

参考文献(References):

[1] 李江遐, 吴林春, 张军, 王陈丝丝, 于倩倩, 彭毅, 马友华. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075-2081.
[2] 王凯荣, 张玉烛, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 476-481.
[3] 周航, 周歆, 曾敏, 刘丽, 杨文弢, 王英杰, 廖柏寒. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果. 中国环境科学, 2014, 34(2): 437-444.
[4] 刘云兴, 罗海斌. 中国城市污水厂污泥处理技术的现状及发展研究. 环境科学与管理, 2013, 38(7): 94-97.
[5] 吴燕明, 吕高明, 周航, 刘丽, 邓贵友, 廖柏寒. 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估. 生态学报, 2014, 34(8): 2146-2154.
[6] 韩承华, 江解增. 重金属污染对蔬菜生产的危害以及缓解重金属污染措施的研究进展. 中国蔬菜, 2014, 1(4): 7-13.
[7] 刘芷宇. 根际微域环境的研究. 土壤, 1993, (5): 225-240.
[8] Cardon Z G, Whitbeck J L. The Rhizosphere: An Ecological Perspective. London: Academic Press, 2007.
[9] Hinsinger P, Gobran G R, Gregory P J, Wenzel W W. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. New Phytologist, 2005, 168(2): 293-303.
[10] Keller H, Röemer W. Cu, Zn, and Cd acquisition by two spinach cultivars depending on P nutrition and root exudation. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2001, 164: 335-342.
[11] Stratton M L, Good G L, Barker A V. The effects of nitrogen source and concentration on the growth and mineral composition of privet. Journal of Plant Nutrition, 2007, 24(11): 1745-1772.
[12] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力. 中国环境科学, 2002, 22(1): 48-51.
[13] 王祖伟, 张辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应. 生态环境学报, 2005, 14(2): 211-213.
[14] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 大沽排污河污灌区土壤重金属富集特征和来源分析. 环境科学, 2008, 29(6): 1693-1698.
[15] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GB 4284-1984 农用污泥中污染物控制标准. 北京: 中国标准出版社, 1984.
[16] 弋良朋, 马健, 李彦. 两种土壤条件下荒漠盐生植物根际系统养分分布的实验研究. 中国沙漠, 2008, 28(3): 443-448.
[17] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
[18] Quevauviller P. Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis I. Standardization. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1998, 17(5): 289-298.
[19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
[20] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618-1995 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1995.
[21] Brown G, Brinkmann K. Heavy metal tolerance in Festuca ovina L. from contaminated sites in the Eifel Mountains, Germany. Plant and Soil, 1992, 143(2): 239-247.
[22] 弋良朋, 马健, 李彦, 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征, 生态学报, 2007, 27(9): 3565-3571.
[23] 孙媛媛, 孙友宝, 盖荣银, 马晓玲, 王娟娟, 邓晓丽, 黄涛宏. 二乙烯三胺五乙酸(DTPA)提取 ICP-AES 法测定土壤中有效态元素. 环境化学, 2015, 34(8): 1578-1579.
[24] 贾月慧, 郭家选, 刘杰, 王敬贤, 杜景东, 高凡. 北京郊区设施菜地剖面中重金属的分布特征. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 282-288.
[25] 任理想. 土壤重金属形态与溶解性有机物的环境行为. 环境科学与技术, 2008, 31(7): 69-73.
[26] 刘丹青, 陈雪, 杨亚洲, 王淑, 李玉姣, 胡浩, 张春华, 葛滢. pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响. 生态学报, 2013, 33(14): 4306-4314.
[27] 李奕林. 水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系. 生态学报, 2012, 32(7): 2066-2074.
[28] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 植物对污泥的响应及其根系对重金属的活化作用. 农业环境科学学报, 2002, 11(5): 121-124.
[29] 王舜和, 李晓晶, 张月勇, 王鑫. 好氧发酵市政污泥对 4 种绿化植物生长及其体内重金属含量的影响. 环境工程, 2015, 33(S1): 1061-1064.